

**Thermal wave flow meter - contains geometrically defined arrangement of sensor modules, derives propagation speeds of thermal wave and fluid using defined equations**

**Patent number:** DE4222458

**Publication date:** 1994-01-13

**Inventor:** PLOECHINGER HEINZ DIPL ING (DE)

**Applicant:** PLOECHINGER HEINZ DIPL ING (DE)

**Classification:**

**- international:** G01F1/68; G01P5/10; G05D23/00; G01P15/00;  
G01N25/18

**- european:** G01F1/68, G01N25/18, G01P5/10, G01P5/18,  
G01F1/708B

**Application number:** DE19924222458 19920708

**Priority number(s):** DE19924222458 19920708

**Abstract of DE4222458**

The wave-shaped propagation of a temp. fluctuation according to a defined equation leads to a propagation speed used for absolute determination of the temp. conductivity of any medium, independently of the type of fluid and state parameters, using a further defined equation.

The propagation speed of the thermal wave and the flow speed of the fluid can be measured simultaneously using a suitable arrangement of several sensor modules. The geometric arrangement of the sensor modules fulfils a defined set of conditions.

**USE/ADVANTAGE** - For measurement of fluid speed independently of the type of fluid, e.g. for flow meters and gas analysers. Simultaneous flow and temp. conductivity measurement can be performed.

---

Data supplied from the **esp@cenet** database - Worldwide



⑯ BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENTAMT

⑯ Offenlegungsschrift  
⑯ DE 42 22 458 A 1

⑯ Int. Cl. 5:  
G 01 F 1/68  
G 01 P 5/10  
G 05 D 23/00  
// G01P 15/00, G01N  
25/18

⑯ Anmelder:  
Plöchinger, Heinz, Dipl.-Ing., 82319 Starnberg, DE

⑯ Erfinder:  
gleich Anmelder

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

⑯ Thermowellen-Durchflußmesser

⑯ Der Thermowellen-Strömungssensor dient zur fluidartun-abhängigen Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeit eines Fluids. Die Messung beinhaltet auch die Temperaturleitfähigkeit des Fluids. Die vorliegende Erfindung beschreibt Methoden und Sensoren, die sich auf die Laufzeitbestimmung bei Überlagerung von thermischer Wellenausbreitung und Strömung stützen und von üblichen, bisher bekannten thermischen Strömungssensoren durch eine oder mehrere der folgenden Eigenheiten abheben:  
 - gleichzeitige Erfassung von Strömungsgeschwindigkeit und Temperaturleitfähigkeit in einem einzigen Meßraum,  
 - Verwendung eines sinusförmigen thermischen Gebersignals, mit einer nach oben begrenzten Frequenz,  
 - Winkelversatz in Strömungsrichtung von mindestens zwei Sensor-Elementen (Thermowellen-Detektoren),  
 - Erzeugung eines elektronischen Abbildes des Signals in einem Thermowellen-Detektor, der auf konstante Temperatur geregelt ist und dessen Leistungsaufnahme den von der Welle herangetragenen Änderungen direkt folgt.

DE 42 22 458 A 1

DE 42 22 458 A 1

## Beschreibung

Der Thermowellen-Durchflußmesser dient zur fluidtunabhängigen Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeit. Die Erfindung beschreibt eine Methode und einen Sensor, der zum Unterschied von üblichen thermischen Sensoren die Fluidart-Abhängigkeit ausschließt und eine einfache Digitalisierung des Ausgangssignals erlaubt.

## a) Die Thermowelle

Allgemeine Betrachtungen über die Wärmeleitfähigkeit führen zu der Erkenntnis, daß eine an einem "Geber" erzeugte sinusförmige Temperaturschwankung sich wellenartig im Medium ausbreitet. Unter vereinfachenden geometrischen sowie die Homogenität und Isotropie betreffenden Voraussetzungen gilt folgende Raum-Zeit-Abhängigkeit der Temperatur:

$$\Theta(x,t) = \Theta_m + \frac{\Delta\Theta \exp(-\xi)}{\sqrt{1+2\beta+2\beta^2}} \sin(2\pi nt - \varepsilon - \xi) \quad (1)$$

wobei:

$x$  – Entfernung vom "Geber"

$t$  – Zeit

$\Theta_m$  – mittlere Temperatur

$\Delta\Theta$  – Amplitude der Schwankung

$n$  – Frequenz der Temperaturschwingung

$a$  – Temperaturleitfähigkeit des Fluids

$\lambda$  – Wärmeleitfähigkeit des Fluids

mit:

$$a = \lambda/c_p/\rho \quad (2)$$

$c_p$  – isobare Wärmekapazität

$\rho$  – Fluid-Dichte

$\alpha$  – Wärmeübertragungskoeffizient Sensor-Medium

$$\xi = x\sqrt{\pi n/a}$$

$$\varepsilon = \arctan(\beta/(1+\beta))$$

$$\beta = \frac{\lambda}{\alpha} \sqrt{\pi n/a}$$

Aus der Analogie zu anderen Wellenerscheinungen und bei Vernachlässigung von  $\beta$  (möglich wenn  $\lambda$  viel kleiner als  $\alpha$ , folgt der Ausdruck der Ausbreitungsgeschwindigkeit:

$$v_0 = 2\sqrt{\pi n} \quad (3)$$

und daraus die Temperaturleitfähigkeit:

$$a = v_0^2/4\pi \quad (4)$$

## b) Der Sensor-Aufbau

Im folgenden bezeichnen wir den einzelnen Meßfühler als Sensor-Element, ihn zusammen mit dem dazugehörigen Regelkreis als Modul und den gesamten Meßaufbau als Sensor. Je nach Funktion sind die Sensor-Elemente "Geber" (Sender) oder "Nehmer" (Empfänger).

Das vorgeschlagene Meßverfahren gründet auf der Laufzeitbestimmung des Thermosignals zwischen zwei oder mehreren Sensor-Elementen. Da die Laufzeit nicht größer sein sollte als die halbe Periode gilt für die Obergrenze der Frequenz:

$$n_{og} = \pi a/L^2 \quad (5)$$

und die Bedingung:

$$n <= \pi a/L^2 \quad (\text{Bedingung A})$$

wobei  $L$  der größte der Abstände zwischen zur Laufzeitbestimmung verwendeten Sensor-Elementen ist.

In einem strömenden Fluid überlagern sich die wellenartige Ausbreitung und die Mitnahme durch die Strömung. Um beiden Erscheinungen Rechnung zu tragen, müssen zwei unabhängige Laufzeitbestimmungen vorgenommen werden, und zwar in verschiedenen Richtungen. (Bedingung B)

Die resultierenden Geschwindigkeiten in den beiden Richtungen seien  $v_1$  bzw.  $v_2$ , die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Thermowelle sei  $v_0$  und die Strömungsgeschwindigkeit des Fluids sei  $v_s$ . Es gilt in Strömungsrichtung:

$$v_1 = v_0 + v_s \quad (6)$$

und in einer Richtung im Winkel  $\phi$  zur anderen:

$$v_2 = v_0 + v_s \cos\phi \quad (7)$$

Zur Erfassung sowohl der Ausbreitungsgeschwindigkeit der Thermowelle als auch der Strömungsgeschwindigkeit des Fluids sollten die eine Richtung die Strömungsrichtung sein und die andere zu dieser in einen Winkel, der folgender Bedingung entspricht:

$$45^\circ < -\phi < -90^\circ \quad (\text{Bedingung C})$$

Der erste Teil der Bedingung C garantiert eine signifikante Abweichung von der Strömungsrichtung und der zweite Teil garantiert auch bei hohen Strömungsgeschwindigkeiten den Empfang des Signals am entsprechenden "Nehmer".

Um einer unerwünschten Abflachung des Signals am "Nehmer" entgegenzuwirken, sollten die Abmessungen der Sensor-Elemente in "Geber"- "Nehmer"-Richtung möglichst klein sein, sie sollten also senkrecht zur in Fig. 1 dargestellten Ebene stehen und im allgemeinen kleine Maße haben. (Bedingung D)

Fig. 1 illustriert allgemein das Prinzip der hier beschriebenen Methode. Wenn G den "Geber" markiert und N, bzw.  $N_2$  die beiden "Nehmer" die zusammen in einer zu den Stromlinien parallelen Ebene in mit  $L_1$ ,  $L_2$  gekennzeichneten Abständen und einem bekannten Winkel  $\phi$ , so ergeben sich, von Ausdrücken (6) und (7) abgeleitet, für die Ausbreitungsgeschwindigkeit bzw. für die Strömungsgeschwindigkeit folgende Ausdrücke:

$$v_0 = (L_2/t_2 - L_1 \cos\phi/t_1)/(1 - \cos\phi) \quad (8)$$

$$v_s = (L_1/t_1 - L_2/t_2)/(1 - \cos\phi) \quad (9)$$

Die in die Ausdrücke (8) und (9) eingehenden Zeiten sollten pure Flugzeiten sein ohne die Übergabe- und Übernahmeverzögerungen, was immer das auch sind, zu enthalten. Technisch kann das Problem anhand von zwei hintereinandergeschalteten "Nehmern" umgangen werden. Die Zeitdifferenz zwischen den beiden an diesen "Nehmern" an kommenden Signalen ist pure Flugzeit.

## c) Bau und Funktion der Module

Die Sensor-Elemente werden unabhängig voneinander, jeweils in einem eigenen Regelkreis, auf konstanten Widerstand (= konstante Temperatur) geregelt. Eine Änderung der Temperatur, der Wärmeleitfähigkeit oder einer anderen thermodynamischen Größe der Umgebung hat eine Änderung der elektrischen Leistung zur Folge, die den Modulen zugeführt wird damit die Temperatur konstant bleibt.

Durch kompensierende Leistungszufuhr bei konstanter Temperatur wird die thermische Trägheit durch elektronische Schnelligkeit ersetzt und durch Verstärkung eine große Empfindlichkeit erreicht.

Die Sensor-Elemente sind identisch in Aufbau, Abmessungen und elektrischen Werten, so daß Einflüsse, wie Änderungen der Temperatur, des Druckes oder der Wärmeleitfähigkeit des Fluids, die der Thermowelle überlagert sind, sich auf alle Module gleichzeitig auswirken und kompensiert werden.

Wird nun eines dieser Module mit einem sich periodisch ändernden Sollwert für die Temperatur beaufschlagt (moduliert), so wird das benachbarte Modul retardiert eine Leistungsreduzierung zeigen, wenn es vom Temperaturmaximum der sich ausbreitenden und bei Strömung auch mitgetragenen Welle überquert wird. (siehe Fig. 1b)

Bei vernachlässigbarer Selbstausbreitungsgeschwindigkeit der Thermowelle wäre dies die reine Thermo-Tracing Methode (möglich für hohe Durchflußgeschwindigkeiten).

Der erfundungsgemäße Durchflußsensor nutzt jedoch im allgemeinen Fall die zusätzliche Möglichkeit aus, eine strömungsunabhängige Größe ( $v_0$ ), und damit eine Fluidartinformation zeitgleich zu der Strömungsgeschwindigkeit des Fluids zu erfassen.

Da die Regeltemperatur periodisch um einen festzulegenden Nullwert schwankt, beispielsweise 100°C, kann man auf die Erfassung der Nulldurchgänge zurückgreifen und ist von der Amplitude der Schwankungen und damit von der Umgebungstemperatur und Temperaturleitfähigkeit des Mediums unabhängig.

Die vorliegende Methode führt die Strömungsmessung somit auf eine reine Laufzeitmessung zwischen den Modulen zurück.

Verwendet man in der elektronischen Auswerteschaltung den Nulldurchgang vom Gebermodul als "Tor-Auf" für ein z. B. hochfrequentes Rechtecksignal, den Nulldurchgang des Empfangsmoduls als "Tor-Zu" so ist die Anzahl der abgegebenen Impulse direkt proportional mit der zu erfassenden Laufzeit.

## d) Anwendungsmöglichkeiten

– als Durchflußmesser und Gasanalysator  
Die erfundungsgemäße oben beschriebene Methode mit entsprechenden Sensoren eignet sich zur gleichzeitigen Strömungs- und Temperaturleitfähigkeitsmessung und damit zum Einsatz in Systemen für die dynamische Fluidanalyse (Strömungs- und Gaskomponentenbestimmung)

– als vektorieller Strömungssensor  
Dadurch, daß die im Winkel zur Stromrichtung gemessene Laufzeit von diesem Winkel abhängt, kann, bei Umkehrung des Prinzips die Strömungsrichtung (Richtung der kleinsten Laufzeit) bestimmt werden. Dazu sind die verschiedensten Anordnungen denkbar, nicht nur in der Ebene sondern auch im Raum. Über die Lauf-

zeitmeßdaten könnte dann die Strömungsrichtung errechnet werden.

– als Beschleunigungssensor

Da die Sensor-Elemente auf z. B. 100°C über die Umgebungstemperatur erhitzt werden, wird die Dichte des mit dem Sensor-Element in Berührung kommenden Fluids kleiner sein als die der weiteren Umgebung und es bildet sich eine Strömung entgegen der Gravitations- oder der Beschleunigungsrichtung. Diese Tatsache kann zur Messung der Richtung und Intensität eines solchen Feldes verwendet werden.

Konstruktiv können die Sensor-Elemente sowohl als Heizdrähte (Wendeln) als auch mikrosystemtechnisch realisiert werden.

## Patentansprüche

1. Thermowellen-Durchflußmeßmethode, dadurch gekennzeichnet, daß die wellenförmige Ausbreitung einer Temperaturschwankung gemäß Gleichung (1) zu dem Ausdruck (2) für die Ausbreitungsgeschwindigkeit führt und dadurch für eine absolute Bestimmungsmethode der Temperaturleitfähigkeit eines beliebigen Mediums (unabhängig von Fluidart und Zustandsparametern) nach folgender Formel geeignet ist:

$$a = v_0^2/4\pi n$$

2. Thermowellen-Durchflußmethode gemäß Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß durch adequate räumliche Anordnung von mehreren Sensormodulen Ausbreitungsgeschwindigkeit der Thermowelle und Strömungsgeschwindigkeit des Fluids gleichzeitig erfaßt werden.

3. Thermowellen-Durchflußsensor, dadurch gekennzeichnet, daß gemäß Anspruch 1 und 2 die geometrische Anordnung der Module den Bedingungen B—D entspricht.

4. Thermowellen-Durchflußsensor gemäß Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, daß das thermische Signal sinusförmig ist und eine durch Rückkopplung selbstgeregelte Meßfrequenz, zur Anpassung an den Strömungsbereich, mit Berücksichtigung der Bedingung A, besitzt.

5. Thermowellen-Durchflußsensor gemäß Anspruch 1—4, dadurch gekennzeichnet, daß die Leistungsaufnahmänderung am "Nehmer" durch Kompensation abgefangen wird und die Nulldurchgänge der Leistungsaufnahme am "Nehmer" zeitlich erfaßt werden. Dadurch werden Fluid- und Geräteparameeter eliminiert.

6. Thermowellen-Durchflußmesser gemäß Anspruch 1—5, dadurch gekennzeichnet, daß der Sensor aus drei Elementen besteht, die wie in Fig. 1 ein Dreieck, in Strömungsrichtung angeordnet, bilden wobei die zu ermittelnden Geschwindigkeiten folgenden Ausdrücken genügen:

$$v_0 = (L_2/t_2 - L_1 \cos\phi/t_1)/(1 - \cos\phi)$$

$$v_z = (L_1/t_1 - L_2/t_2)/(1 - \cos\phi)$$

mit der Möglichkeit  $\phi = 90^\circ$ .

Dieser Aufbau und diese Ausdrücke gelten bei Vernachlässigung der Verzögerungen bei Wärmeabgabe bzw. -aufnahme zwischen Fluid und Sensor-Elementen.

7. Thermowellen-Durchflußsensor gemäß Anspruch 1—5, dadurch gekennzeichnet, daß der Aufbau aus vier Elementen besteht die in einer zur Stromlinie parallelen Ebene entsprechend Fig. 2 angeordnet sind: "Geber", "Nehmer 1" und "Nehmer 2" in einer Stromlinie (Geraden) und "Nehmer 3" mit dem "Geber" auf einer Geraden, die zur Strömungsrichtung einen Winkel  $\phi$  bildet.  $\phi$  kann auch  $90^\circ$  sein. Die zu ermittelnden Geschwindigkeiten haben folgende Ausdrücke:

10

$$v_0 = [L_3/(t_3 - \tau) - (L_2 - L_1) \cos\phi/(t_2 - t_1)]/(1 - \cos\phi)$$

$$v_s = [(L_2 - L_1)/(t_2 - t_1) - L_3/(t_3 - \tau)]/(1 - \cos\phi)$$

wobei  $\tau$  über folgenden Ausdruck ermittelt wird:

15

$$\tau = (L_2 t_1 - L_1 t_2)/(L_2 - L_1)$$

und die gesamte Abgabe- und Aufnahmeverzögerung einschließlich der elektronischen Antwortzeit 20 darstellt. Voraussetzung für die Überlegungen sind, daß alle Module den gleichen Aufbau haben und als Folge auch die gleichen Zeitkonstanten.

8. Thermowellen-Durchflußsensor gemäß Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, daß der Aufbau 25 aus drei sich in einer Geraden befindlichen Elementen besteht, einem "Geber" und zwei "Nehmern" wie in Fig. 3 dargestellt. Diese Aufstellung dient zu Strömungsmessungen, deren Geschwindigkeitsbereichsanfang ein Vielfaches der Ausbreitungsgeschwindigkeit der Thermowelle unter gegebenen Umständen ist d. h. letztere wird vernachlässigt (wie bei allen anderen bekannten Thermo-Tracing-Methoden).

35

$$v_s = (L_2 - L_1)/(t_2 - t_1) - v_0$$

Allerdings besteht auch hier die Möglichkeit, bei definiertem Durchfluß, die Fluidart zu bestimmen, z. B. bei  $v_s = 0$ :

40

$$v_0 = (L_2 - L_1)/(t_2 - t_1) - v_s$$

Diese kann bei gleichbleibendem Fluid als Konstante in den Ausdruck von  $v_s$  eingehen und so 45 können auch kleine Geschwindigkeiten gemessen werden.

9. Thermowellen-Durchflußsensor, dadurch gekennzeichnet, daß er, bestehend aus einer entsprechenden Anzahl von Modulen in gewählter Anordnung, durch Verwendung der Laufzeitmeßdaten dieser Module die Strömungsrichtung bestimmen kann und als vektorieller Strömungssensor dient.

10. Thermowellen-Durchflußsensor, dadurch gekennzeichnet, daß er, eingebaut in ein alleseitig geschlossenes Rohr, gefüllt mit einem adequaten Fluid (Edelgas), Richtung und Intensität eines Beschleunigungs- bzw. eines Gravitationsfeldes erfaßt (Thermowellen-Lot).

11. Thermowellen-Durchflußsensor, gemäß Anspruch 3—10, dadurch gekennzeichnet, daß die Sensor-Elemente sowohl als Heizdrähte (Wendeln), als auch mit den Methoden der Mikrosystemtechnik zum Sensor zusammengebaut werden können.

65

- Leerseite -

**THIS PAGE BLANK (USPTO)**

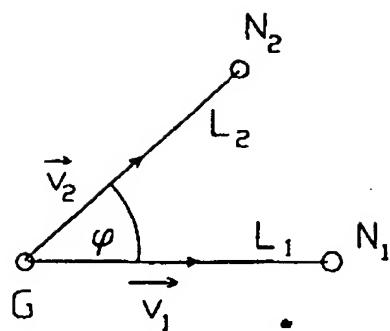


Fig.1a

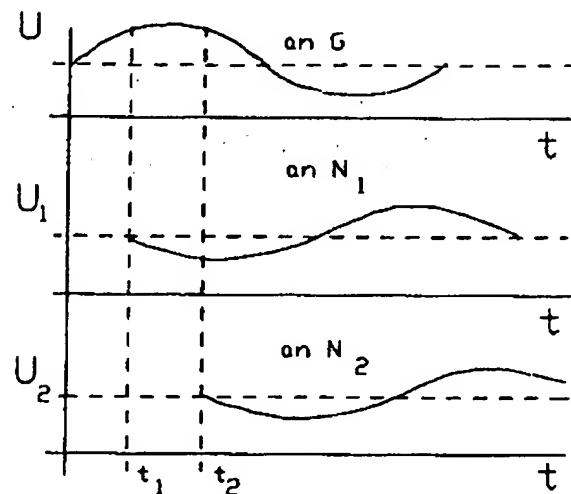


Fig.1b

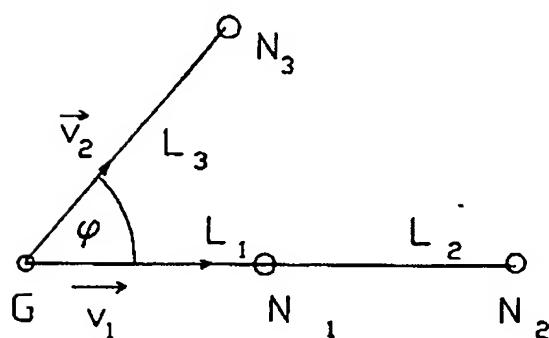


Fig.2

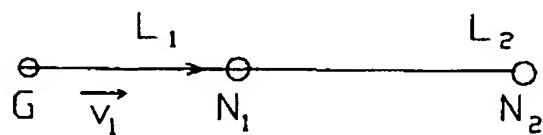


Fig.3

**THIS PAGE BLANK (USPTO)**